

**低温科学A (6/7, 6/14, 6/21)**

**レーザーによる希薄原子気体の冷却と  
ボース・アインシュタイン凝縮**

**物理第一教室 量子光学研究室**

**<http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp>**

**高橋義朗**

**[yitk@scphys.kyoto-u.ac.jp](mailto:yitk@scphys.kyoto-u.ac.jp)**

**5号館-404号室**

# 講義予定

## 1. イントロダクション

高分解能レーザー分光からボース・アインシュタイン凝縮へ

## 2. 光と原子の相互作用

2 - 1. 光子とは

2 - 2. 2準位原子とは

2 - 3. 光子と原子の相互作用

## 3. レーザー冷却・トラップの原理

3 - 1. 光が原子に及ぼす力: その1 - 放射圧

3 - 2. ドップラー冷却法

3 - 3. 光が原子に及ぼす力: その2 - 双極子力

3 - 4. レーザー冷却原子の応用

## 4. 原子気体のボース・アインシュタイン凝縮 (BEC)

4 - 1. BECの生成

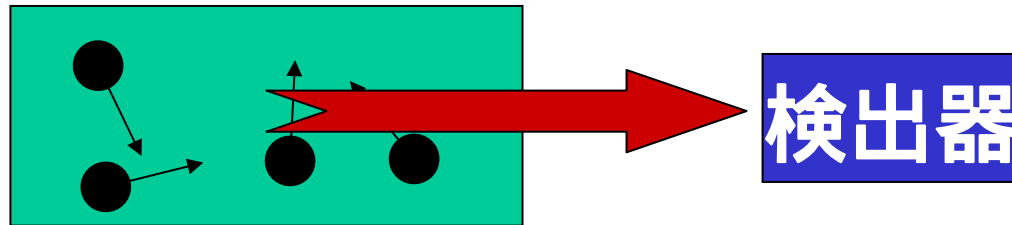
4 - 2. 基本的性質

4 - 3. 様々な発展

# 1. イントロダクション

## 従来の原子分光光学@T=300 K

1) ガラスセル中のランダムに熱運動する原子集団



ドップラー広がり、衝突広がり  $\gg$  原子エネルギー準位の微細な構造:  
( $\sim 1\text{GHz}$ ) ( $< 100\text{MHz}$ )

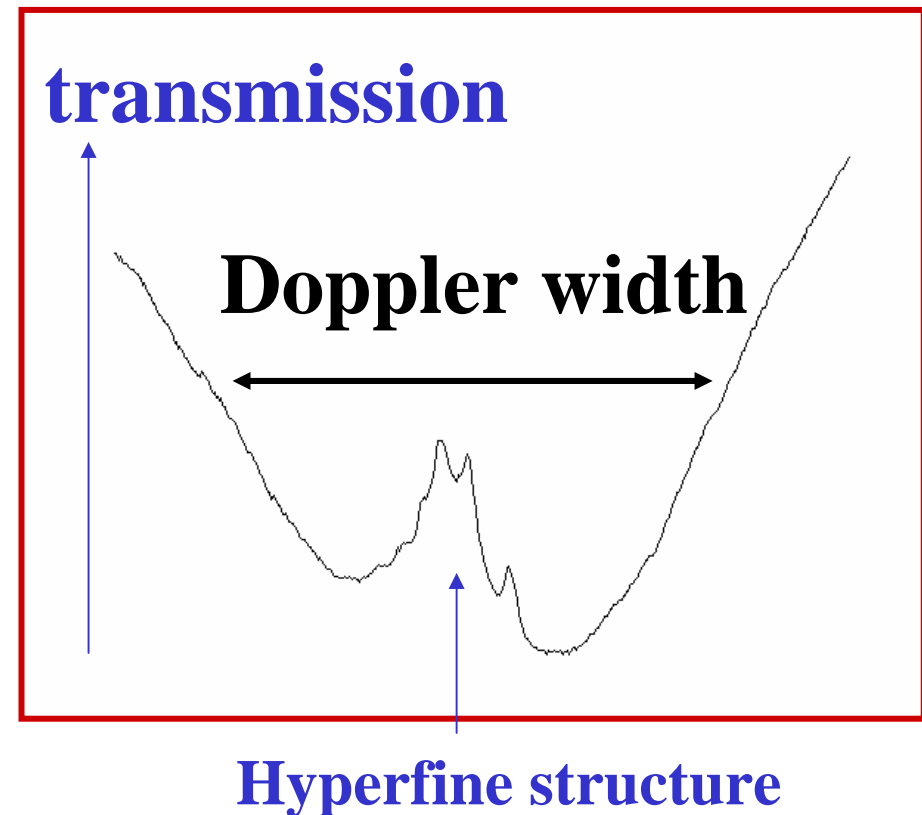
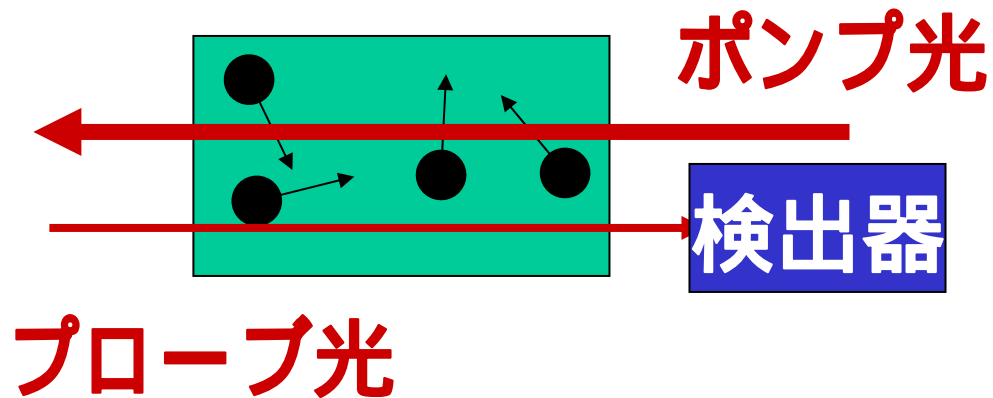
光のドップラー(Doppler)効果:

「速度 $v_0$ で角周波数  $\omega$  の光源に向かっていく原子  
が感じる光の周波数は  $\omega' = \omega(1 + \frac{v_0}{c})$  となる」

# 飽和吸収分光法の開発

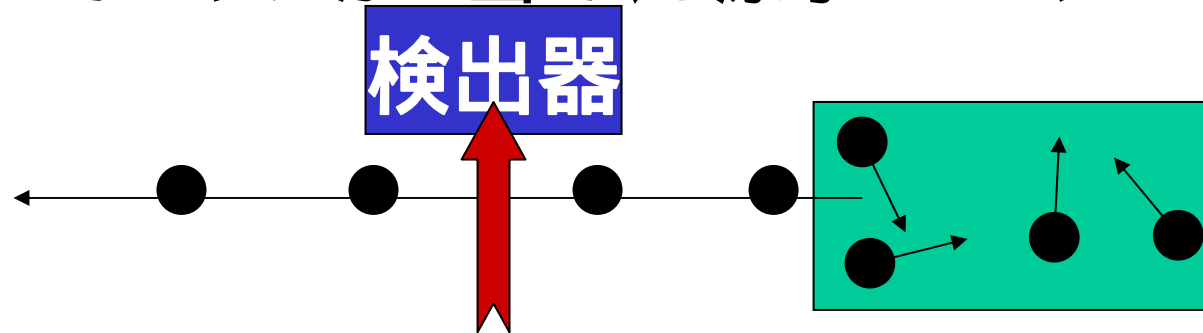


1981 A. L. Schawlowほか **レーザー分光学への寄与**



# 高精度原子分光法の開発

## 2) 高温のオーブンから出てくる原子ビーム

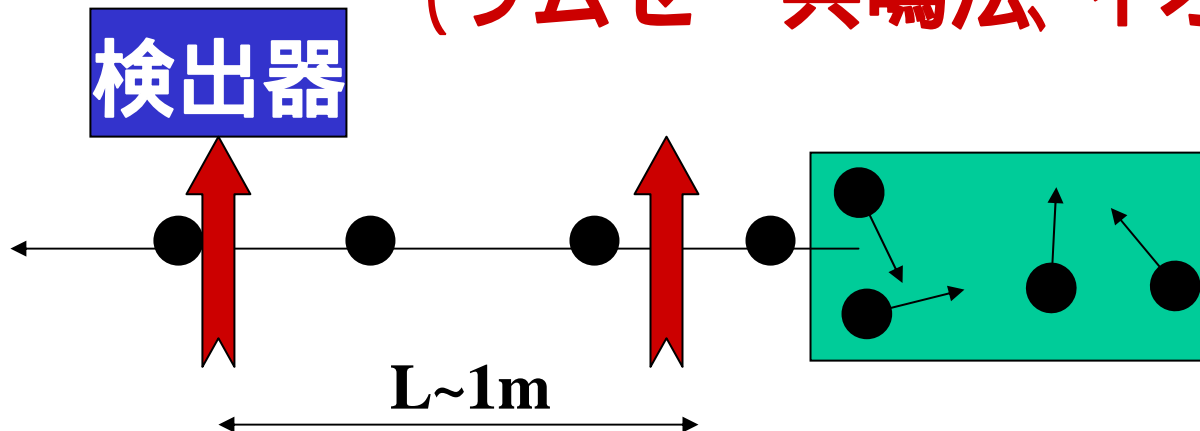


短い相互作用時間:  $\sim 10 \mu\text{s}$



1989 N. F. Ramsey H. G. Dehmelt, W. Paul

(ラムゼー共鳴法、イオントラップ法)

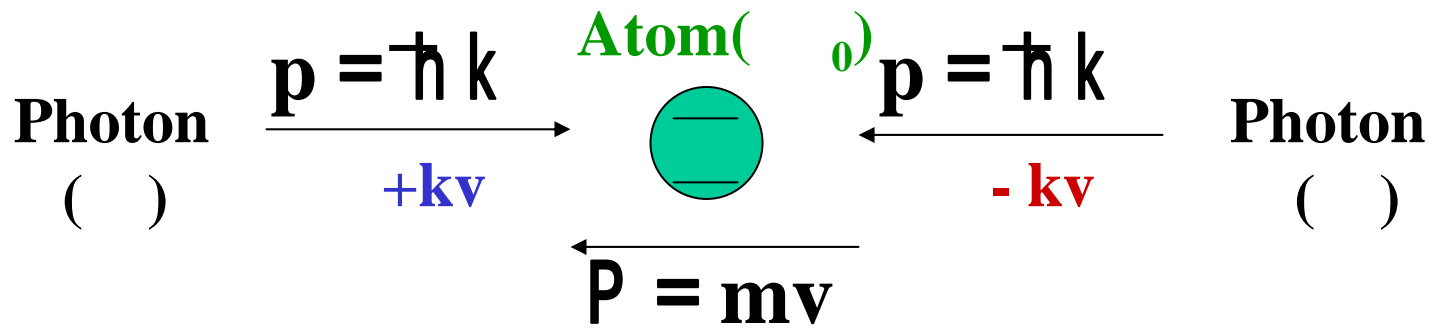


相互作用時間:  
 $\sim 1 \text{ ms}$

# 中性原子のレーザー冷却法の開発



1997 S. Chu, C. Cohen-Tannoudji, W. D. Phillips



*“Doppler Cooling”*

$T = 1 \mu\text{K}$ 、

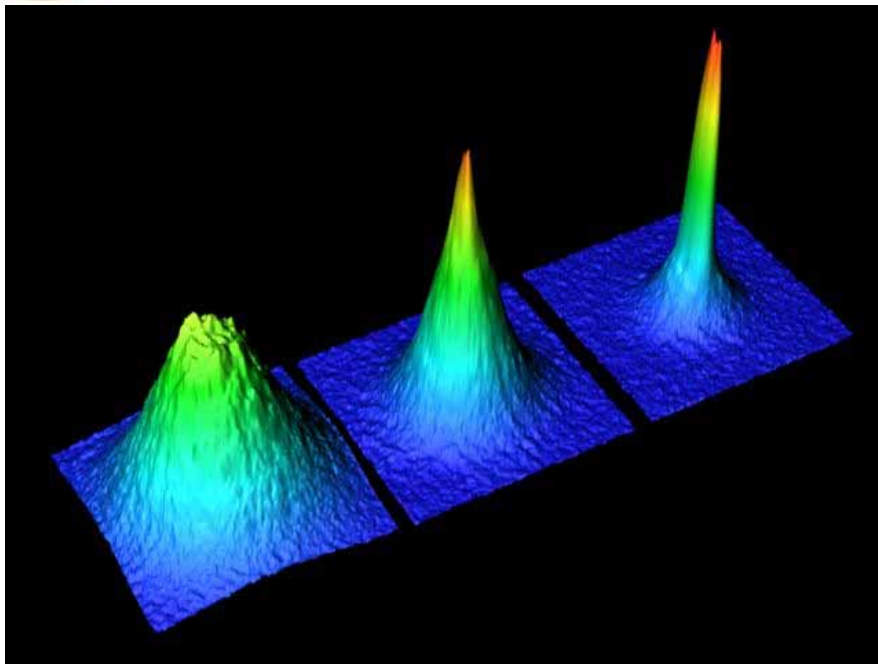
相互作用時間  $> 1 \text{h}$ 、

光による原子の運動のコントロール

# 原子気体のボース・アインシュタイン凝縮の実現



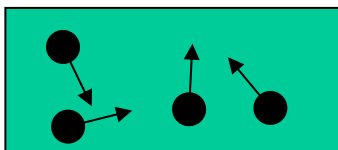
2001 E. Cornell, C. Wieman, W. Ketterle



$$\rho_{PSD} = n\lambda_{dB}^3 = n\left(h / \sqrt{2\pi m_A k_B T}\right)^3$$

位相空間密度:  $> 2.612$

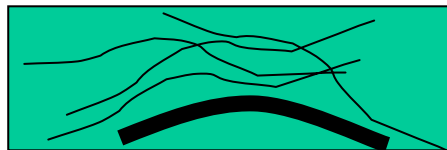
$T_C = 100$  nK,  $n = 10^{14}/\text{cm}^3$



高温: 原子はランダムに熱運動をしています。



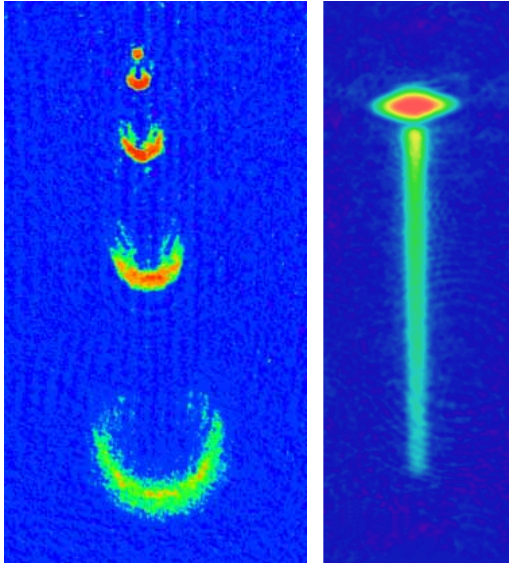
低温: レーザー冷却法により低温になった原子では、波動性が顕著に表れます。



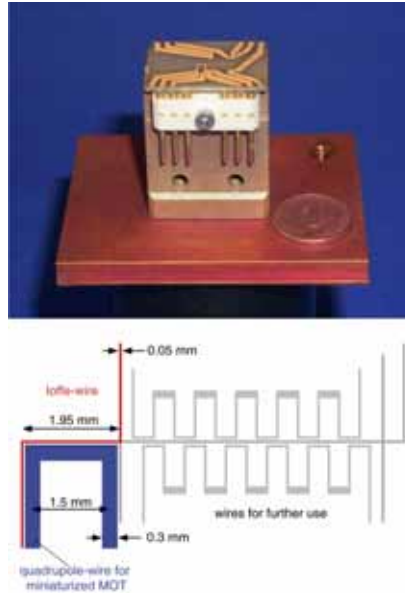
極低温: さらに冷却されるとお互いの波が重なり合い、純粋に量子力学的な相転移が起きます。これがボース・アインシュタイン凝縮(BEC)です。

# Various Applications of Atomic Quantum Gases

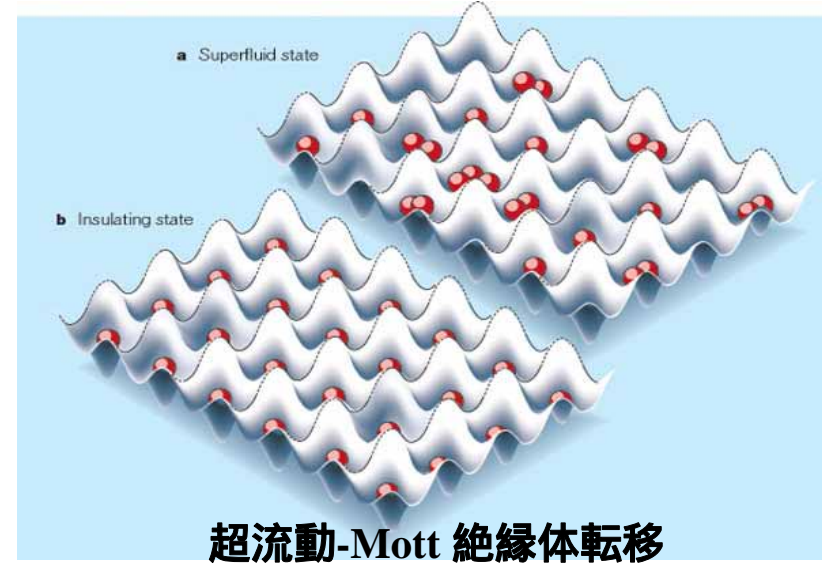
Atom Laser:  
コヒーレントな物質波



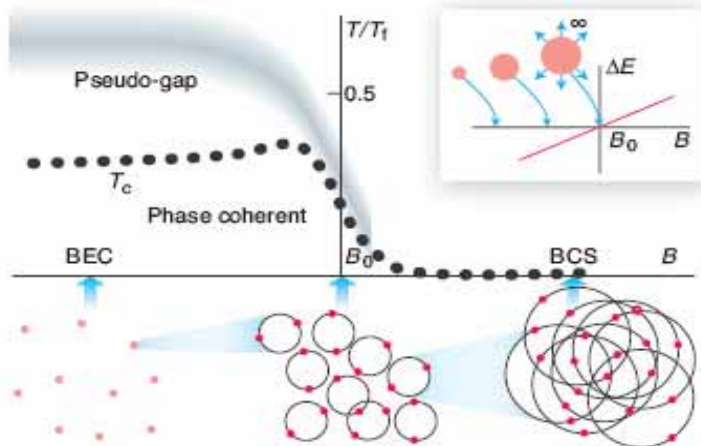
Atom Chip:  
原子回路



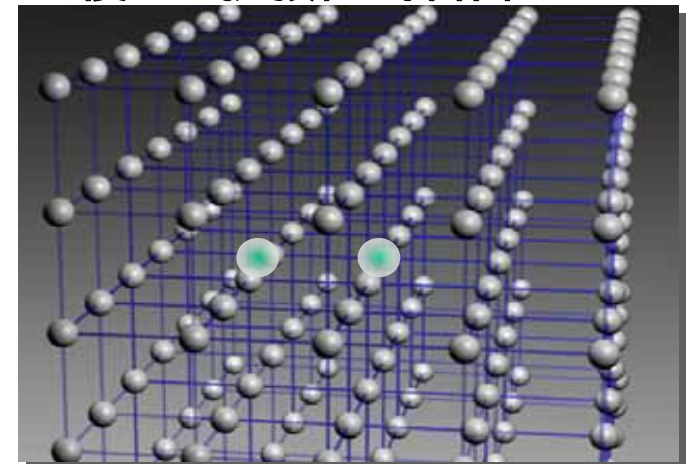
Quantum Simulation:  
原子を使ったクリーンな“凝縮系”物理



BEC-BCS Crossover:  
原子間相互作用の完全なコントロール



Quantum Computation:  
優れた拡張性と操作性





## 2. 光子と原子の相互作用

### 2 - 1. 光子とは

(i) 定義 電磁波を量子化して得られる粒子

$$\text{エネルギー: } \varepsilon = h\nu = \hbar\omega$$

$$\text{運動量: } p = h/\lambda = \hbar k \quad (h: \text{Planck定数})$$

(ii) スペクトル

ラジオ波  $\sim 1\text{MHz}(=10^6 \text{ Hz})$

マイクロ波  $\sim 1\text{GHz}(=10^9 \text{ Hz})$

光  $\sim 10^{14} \text{ Hz}$

X-線  $\sim 10^{18} \text{ Hz}$

(iii) 偏光

$$\vec{E} = (\vec{E}_x + \vec{E}_y) \cos(kz - \omega t)$$

(iv) 光子の集団としてのレーザー光

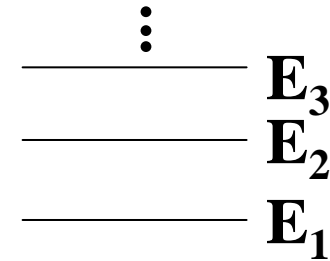
→ “コヒーレント(位相が揃っている)”である  
単色性、指向性がよい

vs ランプ光: “インコヒーレント”である: 単色性、指向性がよくない

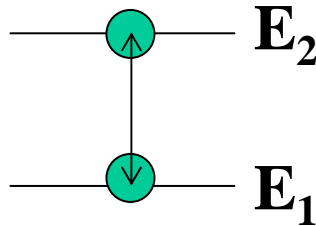
## 2. 光子と原子の相互作用

### 2 - 2. 原子とは

- (i) 原子の定義 原子核と電子の束縛状態  
→ 離散的エネルギー準位を持つ



- (ii) 2準位原子 → 特定の2準位 $E_1$ と $E_2$ しか考えない



- (iii) ド・ブローイ (de Broglie) 波

$$\lambda_{dB} = h / p$$

→ 原子光学

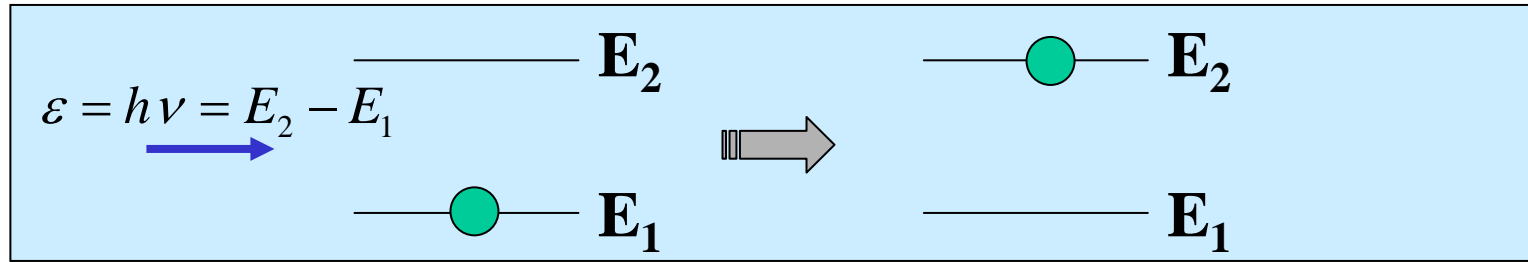
thermal de Broglie 波長:

$$\lambda_{th} = h / \sqrt{2\pi m k_B T}$$

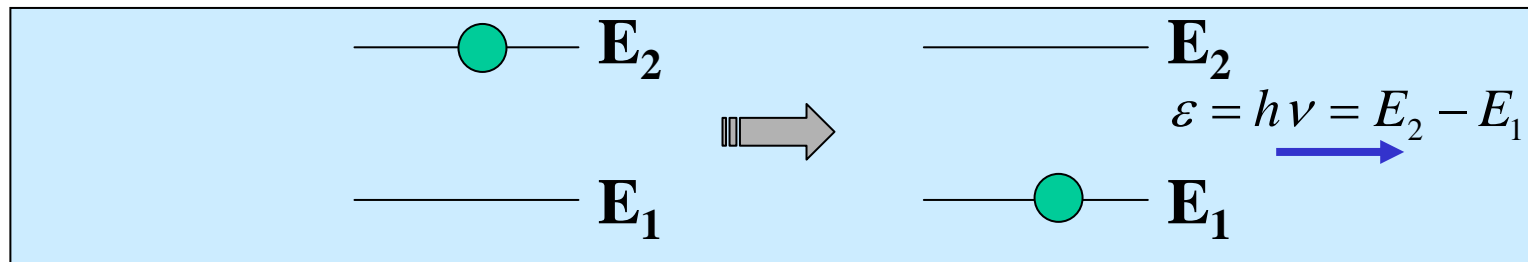
## 2. 光子と原子の相互作用

### 2 - 3. 光子と原子の相互作用

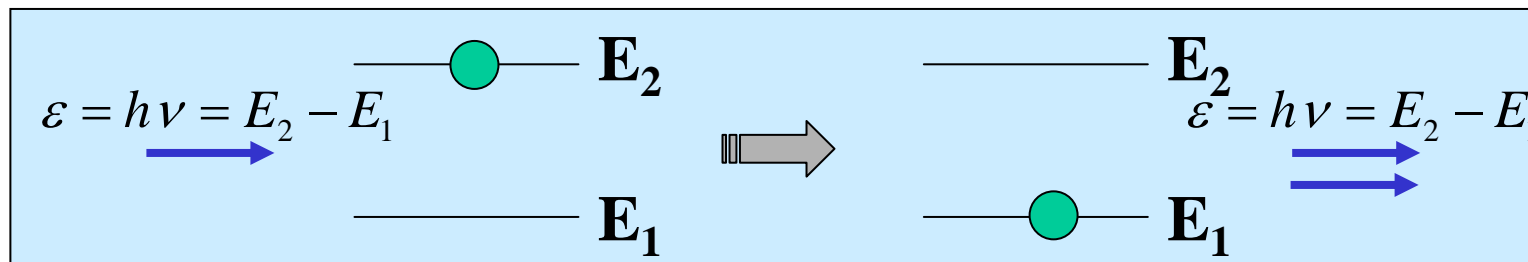
#### (i) 吸収、自然放出、誘導放出



“吸収”



“自然放出”



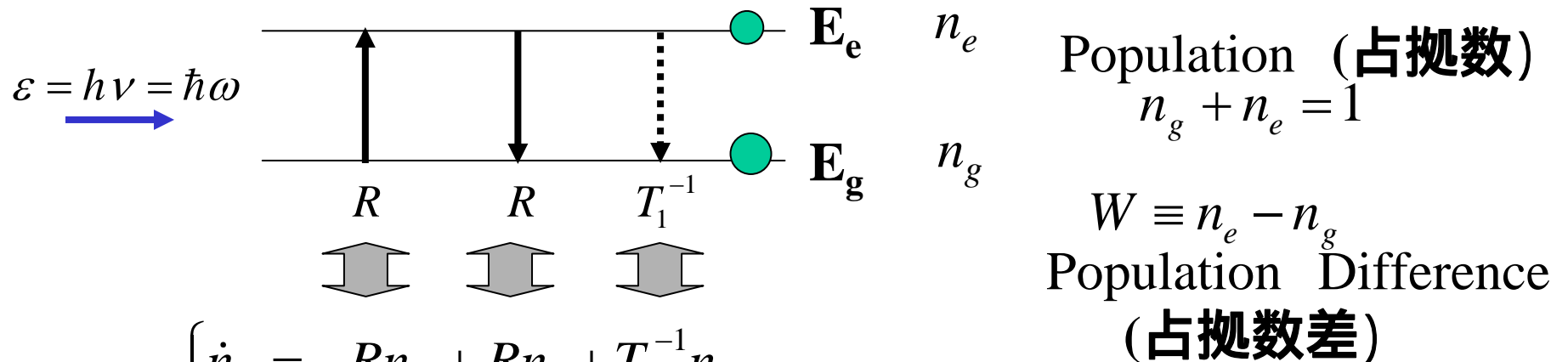
“誘導放出”

**LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**

#### (ii) Bohr's Quantum Jump

## 2. 光子と原子の相互作用

(iii) レート方程式による取り扱い



$$\begin{cases} \dot{n}_g = -Rn_g + Rn_e + T_1^{-1}n_e \\ \dot{n}_e = +Rn_g - Rn_e - T_1^{-1}n_e \end{cases}$$

$$\dot{W} = -2RW - T_1^{-1}(1+W) \quad \dot{W} = 0 \rightarrow W_{st} = -\frac{1}{1+2T_1R}$$

$$R = \frac{1}{2T_1} \frac{I/I_s}{1 + (2T_1\Delta)^2}$$

$$\hbar\Delta = (E_e - E_g) - \hbar\omega$$

Detuning(離調)